

В. І. НОСУЛЕНКО, В. М. ШМЕЛЬОВ, А. А. ПАЩЕНКО

ВПЛИВ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ НА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ

Електророзрядна обробка металів, як високоефективний процес з унікальними технологічними можливостями, має все більш широке практичне застосування. Це супроводжується в подальшому вдосконаленнями процесів електророзрядної обробки і, зокрема, способу розмірної обробки металів електричною дугою. Проте, порівняно з зазначеними традиційними процесами електророзрядної (електроискровой) обробки, в умовах процесу розмірної обробки електричною дугою якості обробленої поверхні, власне шорсткість, залишається все ще недостатньо визначеною і, звичайно обмежується значеннями $Ra \geq 6,3$ мкм, що обмежує область раціонального застосування способу. В результаті аналізу процесу обробки виявлено, що для забезпечення високої якості обробленої поверхні, необхідно в зоні обробки забезпечити оптимальні умови протікання процесу розмірної обробки електричною дугою. З цією метою запропоновано технологічні прийоми, що дозволять покращити умови протікання процесу розмірної обробки електричною дугою в зоні обробки, та оптимальну конструкцію електрода-інструмента. За зазначених умов виконано математичне моделювання процесу розмірної обробки електричною дугою та отримано математичну модель шорсткості обробленої поверхні. Наведено графіки залежності шорсткості обробленої поверхні в залежності від сили технологічного струму та статичного тиску робочої рідини з різною величиною припуску на обробку. Наведено конструкцію електрода-інструмента з двома робочими кромками, застосування якого дозволить отримувати за один перехід необхідну якість обробленої поверхні. Описано вплив фізико-технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою на якість обробленої поверхні. Показано, що якість обробленої поверхні визначається, перш за все, динамічний тиск робочої рідини та характером її течії (ламінальний або турбулентний) і, в меншій мірі, силою технологічного струму, та не поступається порівняно з відомими процесами. Описано технологічний прийом та технічні рішення за умов реалізації процесу розмірної обробки електричною дугою, що забезпечують якість обробленої поверхні, власне шорсткості, до $Ra \leq 0,63$ мкм і менше.

Ключові слова: електрична дуга, шорсткість обробленої поверхні, електрод-інструмент, припуск на обробку, робоча рідина, гідродинаміка процесу розмірної обробки електричною дугою.

В. И. НОСУЛЕНКО, В. Н. ШМЕЛЕВ, А. А. ПАЩЕНКО

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ

Электроразрядная обработка металлов, как высокоэффективный процесс с уникальными технологическими возможностями, имеет все более широкое практическое применение. Это сопровождается в дальнейшем совершенствованиями процессов электроразрядной обработки и, в частности, способа размерной обработки металлов электрической дугой. Однако по сравнению с указанными традиционными процессами электроразрядной (электроискровой) обработки, в условиях процесса размерной обработки электрической дугой качество обработанной поверхности, собственно шероховатость, остается все еще недостаточно определенной и, обычно ограничивается значениями $Ra \geq 6,3$ мкм, ограничивает область рационального применения способа. В результате анализа процесса обработки обнаружено, что для обеспечения высокого качества обработанной поверхности, необходимо в зоне обработки обеспечить оптимальные условия протекания процесса размерной обработки электрической дугой. С этой целью предложено технологические приемы, которые позволяют улучшить условия протекания процесса размерной обработки электрической дугой в зоне обработки, и оптимальную конструкцию электрода-инструмента. При указанных условиях выполнено математическое моделирование процесса размерной обработки электрической дугой и получена математическая модель шероховатости обработанной поверхности. Приведены графики зависимости шероховатости обработанной поверхности в зависимости от силы технологического тока и статического давления рабочей жидкости с разной величиной припуска на обработку. Приведена конструкция электрода-инструмента с двумя рабочими кромками, применение которого позволит получать за один переход необходимое качество обработанной поверхности.

Описано влияние физико-технологических характеристик процесса размерной обработки электрической дугой на качество обработанной поверхности. Показано, что качество обработанной поверхности определяется, прежде всего, динамическое давление рабочей жидкости и характером ее течения (ламинарный или турбулентный) и, в меньшей степени, силой технологического тока, и не уступает по сравнению с известными процессами. Описаны технологические приемы и технические решения в условиях реализации процесса размерной обработки электрической дугой обеспечивающие качество обработанной поверхности, собственно шероховатости, до $Ra \leq 0,63$ мкм и меньше.

Ключевые слова: электрическая дуга, шероховатость обработанной поверхности, электрод-инструмент, припуск на обработку, рабочая жидкость, гидродинамика процесса размерной обработки электрической дугой.

V. I. NOSULENKO, V. N. SHMELYOV, A. A. PASHCHENKO

INFLUENCE OF PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF DIMENSIONAL MACHINING OF METALS BY AN ELECTRIC ARC ON QUALITY OF PROCESSING

Electro-discharge metal processing, as a highly efficient process with unique technological capabilities, is increasingly widespread in practice. This is accompanied by further improvements in the processes of electric-discharge processing, and in particular, the method of dimensional machining of metals by an electric arc. However, in comparison with the said conventional processes of electric discharge (electro-spark) processing, under the conditions of the process of dimensional machining by electric arc, the quality of the processed surface, in fact, the roughness, is still not sufficiently defined and is usually limited to values of $Ra \geq 6.3$ μm, which limits the rational use of the method. As a result of the analysis of the machining process, it has been found that in order to ensure a high quality of the treated surface, it is necessary to provide optimal conditions for the process of dimensional machining by an electric arc in the processing zone. For this purpose, technological methods have been proposed that will improve the conditions for the process of dimensional machining by an electric arc in the processing zone, and the optimal construction of the electrode-tool. Under these conditions mathematical modeling of the process of dimensional machining by an electric arc is performed and a mathematical model of roughness of the processed surface is obtained. The graphs of the surface roughness dependence on the technological current and the static pressure of the working fluid with varying amounts of allowance for processing are given. The construction of an electrode-tool with two working edges is presented, the application of which will allow to receive the required quality of the processed surface in one transition.

The influence of physical-technological characteristics of the process of dimensional machining by electric arc on the quality of the processed surface is described. It is shown that the quality of the treated surface is determined, first of all, by the dynamic pressure of the working fluid and the nature of its flow (laminar or turbulent) and, to a lesser extent, by the force of the technological current, and is not inferior to the known processes. Are described technological techniques and technical solutions in the conditions of implementation of the process of dimensional machining by an electric arc ensuring the quality of the treated surface, in fact, the roughness, to $Ra \leq 0.63$ μm and less.

Keywords: electric arc, roughness of the processed surface, electrode-tool, allowance for processing, working fluid, hydrodynamics of the process of dimensional machining by an electric arc

Вступ. Електророзрядна обробка металів, як високоефективний процес з унікальними технологічними можливостями, має все більш широке практичне застосування [1]. Це супроводжується в подальшому вдосконаленнями процесів (способів) електророзрядної обробки і, зокрема, способу розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) [2, 3], яка порівняно з процесами традиційної електророзрядної обробки, що засновані на використанні нестационарних електричних розрядів, забезпечує ряд переваг і перш за все багаторазове підвищення продуктивності.

Проте, порівняно з зазначеними традиційними процесами електророзрядної (електроіскрової) обробки, в умовах процесу РОД якість обробленої поверхні, власне шорсткість, залишається все ще недостатньо визначеною і, звичайно обмежується значеннями $Ra \geq 6,3$ мкм, що обмежує область раціонального застосування способу. В цьому зв'язку розглянемо вплив фізико-технологічних характеристик процесу РОД на якість обробленої поверхні і покажемо на підставі теоретичних і експериментальних досліджень на прикладі прошивних операцій по внутрішньому і зовнішньому контурах, що якість обробленої поверхні в умовах РОД, власне шорсткість, може досягти значень $Ra 0,63$ мкм, тобто восьмого класу і вище.

Основна частина. При горінні електричної дуги в умовах РОД геометричні і енергетичні характеристики дуги, а відповідно, і технологічні характеристики процесу є функцією технологічних параметрів сили технологічного струму I і динамічного тиску потоку робочої рідини P_d , а фізико-технологічна модель процесу може бути описана відомим виразом [2]:

$$y = kI^\alpha P_d^\beta, \quad (1)$$

де y – будь-який технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу;

k – коефіцієнт розмірності;

I – сила струму, приймають в межах від декількох ампер до декількох тисяч ампер, визначає продуктивність обробки і по суті відображає кількісну сторону процесу;

P_d – динамічний тиск потоку, приймають від $1 \dots 2$ кПа до 1 МПа і більше, визначає якість обробки (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і відображає якісну сторону процесу;

α і β – показники ступеня для різних технологічних характеристик.

Зі співвідношення (1) випливає, що в умовах РОД є можливим, по-перше ввести в зону обробки практично будь-які потужності від найменших до найбільших, а значить, забезпечити будь-яку доцільну продуктивність, по-друге, можливо реалізувати обробку в найширшому діапазоні режимів – від розмірного плавлення до тонкого розмірного випаровування при відповідній зміні якості обробки, і це незалежно від сили струму. І досягається це мобільно, в потрібний час, в потрібному місці простим регулюванням I і P_d при використанні найпростішого обладнання і наявності простого і дешевого інструменту.

Якість обробленої поверхні визначається її шорсткістю і глибиною зони термічного впливу, є переважно функцією динамічного тиску потоку робочої рідини і менше, сили технологічного струму і покращується при збільшенні динамічного тиску потоку та зменшенні сили струму і, в цілому, має коливатись в найширших межах. І дійсно глибина, структура і твердість зони термічного впливу легко регулюються за рахунок зміни динамічного тиску потоку робочої рідини і при збільшенні останнього до відповідних значень, незалежно від сили струму, ця зона може бути практично відсутня [4, 5]. Що ж до шорсткості обробленої поверхні, наприклад, для прошивних операцій, та за умов реалізації відомих технологічних схем формоутворення як по внутрішньому, так і зовнішніх контурах [6] шорсткість обробленої поверхні, звичайно обмежена значеннями $Ra \geq 6,3$ мкм, що, відповідно, обмежує технологічні можливості процесу, зокрема що стосується виготовлення штампного інструменту [7, 8]. В цьому зв'язку виникає необхідність теоретичних і експериментальних досліджень процесу РОД з метою підвищення якості обробки, власне шорсткості обробленої поверхні.

Аналізуємо вираз (1) – визначальними для якості обробки є динамічний тиск робочої рідини в зоні обробки, який є функцією координати зони обробки. Визначимо динамічний тиск потоку робочої рідини P_d в довільній точці зони обробки, наприклад, при прошиванні по внутрішньому контуру, коли отримують отвір (рис.1).

Запишемо для цього рівняння Бернуллі [9] для перерізів I-I і II-II:

$$P_{S \text{ I-I}} = \frac{\rho v_{II-II}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \lambda \frac{l_i}{d_i} \frac{\rho v_i^2}{2} + \sum_{k=1}^m \xi_k \frac{\rho v_k^2}{2}, \quad (2)$$

де v_{II-II} – швидкість потоку на виході з зазору, м/с;

λ – коефіцієнт опору на довжині відповідної траси;

l_i – довжина відповідної траси, м;

$d_i = D_o - d = 2\delta$ – гідрравлічний діаметр кільцевого зазору, м;

δ – односторонній міжелектродний зазор, м;

v_i та v_k – швидкість потоку на відповідних ділянках траси, м/с;

ξ_k – коефіцієнт місцевого опору (вхід в зазор ξ_1 , поворот ξ_2 , ξ_3 вихід ξ_4).

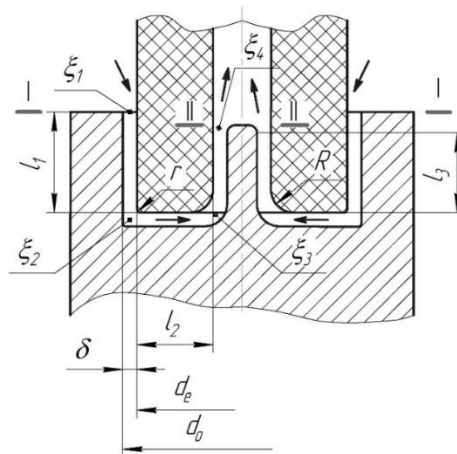


Рис. 1 – Схема формоутворення отвору

Із виразу (2) швидкість витікання рідини із зазору (переріз II-II) визначають за формулою:

$$v_{II-II} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(P_{s\ I-I} - \sum_{i=1}^n \lambda \frac{l_i}{d_i} \frac{\rho v_i^2}{2} - \sum_{k=1}^m \xi_k \frac{\rho v_k^2}{2} \right)} \quad (3)$$

Тоді розхід рідини в цілому складе:

$$Q = v_{II-II} F_{\theta} \quad (4)$$

де F_{θ} – площа поперечного перерізу щілини на виході із зазору, м²: $F_{\theta} = L_{\theta} \delta_{\theta}$

Швидкість потоку рідини в довільній точці i, k зони обробки визначають як:

$$v_{i,k} = Q / F_{i,k} \quad (5)$$

де $F_{i,k}$ – площа поперечного перерізу щілини рівного гідралічного опору, на якій знаходиться задана точка:

$$F_{i,k} = L_{i,k} \delta_{i,k} \quad (6)$$

де $L_{i,k}$ – розгортка лінії (еквідистанти) рівного гідралічного опору, на якій знаходиться задана точка i, k ;

$\delta_{i,k}$ – зазор відповідно в точках i, k .

Тому

$$v_{i,k} = \frac{v_{II-II} F_{\theta}}{L_{i,k} \delta_{i,k}} \quad (7)$$

Тоді

$$P_{d\ II-II} = \frac{\rho v_{II-II}^2}{2} \frac{P_{s\ II-II}}{1 + F_{\theta}^2 \left[\sum_{i=1}^n \lambda \frac{l_i}{d_i} \left(\frac{1}{L_i \delta_i} \right)^2 + \sum_{k=1}^m \xi_k \left(\frac{1}{L_k \delta_k} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

І, відповідно

$$v_{II-II} = \frac{\rho v_{II-II}^2}{2} \sqrt{\frac{P_{s\ I-I}}{\rho \left[1 + F_{\theta}^2 \left[\sum_{i=1}^n \lambda \frac{l_i}{d_i} \left(\frac{1}{L_i \delta_i} \right)^2 + \sum_{k=1}^m \xi_k \left(\frac{1}{L_k \delta_k} \right)^2 \right] \right]}} \quad (9)$$

Надалі, використовуючи залежності (9), (4), (5), (6) визначають P_d в довільній точці i, k зони обробки, який є різним для різних точок зони обробки і, отже, є різними енергетичні характеристики дуги і отже, є різною шорсткість обробленої поверхні для зазначених точок обробки.

Тому, згідно зазначеного, з точки зору формування шорсткості обробленої поверхні, процес РОД є стохастичним, тобто випадковим і недостатньо керованим, але, з іншої сторони, за умов реалізації відповідних технологічних прийомів, зокрема наявності відповідної технологічної схеми формоутворення і режимів обробки, отримують певний, визначений технологічний результат, а саме

шорсткість обробленої поверхні до $Ra \leq 0,63$ мкм, і тому такий процес треба розглядати як детермінований, тобто керований з визначеним кінцевим результатом. Залишається лише описати закони такого керування і, в підсумку, впевнитись, що шорсткість обробленої поверхні в умовах РОД може керуватись в найширших межах і не поступається відомим процесам.

В цьому зв'язку, перерахуємо фактори, що впливають на шорсткість обробленої поверхні. Це, згідно викладеного, сила технологічного струму I і динамічний тиск потоку робочої рідини P_d . Що ж до сили технологічного струму, то, в загальному випадку, при її збільшенні, шорсткість обробленої поверхні зростає. Проте за відповідних умов розмірного випаровування спостерігається так званий згладжуючий ефект і шорсткість отриманої поверхні може зменшуватись. Що ж до динамічного тиску робочої рідини, то згідно рівнянь (2...9), він є функцією координати точки обробки і є різним для цих точок і, отже, є різною для різних точок обробки шорсткість обробленої поверхні. За цих умов приймаємо до уваги, що технологічний результат, власне шорсткість обробленої поверхні, формується певними координатами точок в зоні обробки, якщо конкретно, то певною робочою кромкою електрода-інструмента (ЕІ) і, для наведеної схеми формоутворення рис.1, це робоча кромка ЕІ радіусом r , що формує шорсткість обробленої поверхні l_i яка, власне, і визначає шорсткість отриманого отвору. За цих умов визначальними для шорсткості отриманого отвору є енергетичні характеристики дуги, які функціонально залежать від динамічного тиску робочої рідини саме на цій робочій кромці електрода-інструмента, але також, не меншою мірою, вони залежать від характеру течії робочої рідини, яка може бути ламінарною або турбулентною. За умов ламінарної течії робочої рідини енергетичні характеристики дуги є більш стабільними і керованими, і як наслідок, шорсткість обробленої поверхні покращується, вона знижується. Звідси висновок – для зменшення шорсткості обробленої поверхні необхідно забезпечити рівномірну, ламінарну течію робочої рідини саме на робочій кромці електрода-інструмента.

В цьому зв'язку для розрахункової схеми рис.1 опишемо технологічні прийоми, які забезпечують рівномірну течію робочої рідини в межах робочої кромки радіусом r . Для цього виконаємо аналіз гідралічних опорів по трасі робочої рідини в послідовності, що відповідає течії робочої рідини і за рахунок відповідних технологічних прийомів ці опори зменшимо до мінімально можливих значень або їх уникнемо і, як наслідок, забезпечимо максимально можливу рівномірність течії робочої рідини, що, в свою чергу забезпечить мінімальну шорсткість обробленої поверхні.

На вході в міжелектродний зазор маємо місцевий опір ζ_1 , який за умов сталого процесу є незмінним і зменшити його не можна. Ділянка траси l_1 характеризується коефіцієнтом гідралічного опору λ_1 і, за умов невеликих значень міжелектродного зазору 0,05...0,1 мм, цей гідралічний опір є чутливим до

будь-яких змін тиску робочої рідини і, згідно експериментальних даних, може змінюватись в широких межах, а отже змінюється і шорсткість обробленої поверхні. Тому на цій ділянці є потреба використати відповідні технологічні прийоми, щоб забезпечити рівномірність течії робочої рідини інакше, наприклад, якщо ЕІ має робочий пояс, а це має деяке практичне застосування, спостерігається нерівномірність течії робочої рідини при зануренні цього пояса в отвір і, як наслідок, отримуємо нерівномірну шорсткість обробленої поверхні отвору у вигляді поясів різної шорсткості. Отже є необхідним забезпечити на ділянці l_1 рівномірну течію робочої рідини. Для цього запропоновано використати ЕІ з нахилоною входною робочою поверхнею $\alpha \geq 0^\circ 30'$. Це забезпечує течію робочої рідини на ділянці l_1 в звужену щілину і, як наслідок, на цій ділянці забезпечується ламінарний характер течії робочої рідини за рахунок її всебічного і нерівномірного стиснення.

Місцевий опір ξ_2 на повороті є технологічно необхідним; визначається радіусом $r \geq 0,5$ мм.

Ділянка траси l_2 характеризується коефіцієнтом гідравлічного опору λ_2 і відрізняється тим, що при постійному зазорі на цій ділянці швидкість течії робочої рідини зростає в напрямку від периферії ЕІ до його центра, що викликає зростання гідравлічного опору і, як наслідок, нерівномірність течії робочої рідини, що не бажано. Щоб зберегти швидкість робочої рідини і таким чином забезпечити рівномірність її течії, а надалі спадковість такої рівномірності достатньо забезпечити нахил цієї торцевої поверхні ЕІ в межах $\beta = 3 \dots 5^\circ$, що дещо збільшує міжелектродний зазор і отже забезпечує рівномірність її течії.

Місцевий опір ξ_3 зменшується при збільшенні радіуса $R \geq 5$ мм.

Ділянка траси l_3 утворюється видовженими дугами, характеризується збільшеним зазором і незначними значеннями гідравлічного опору.

Місцевий опір ξ_4 є незначним.

На підставі зазначеного аналізу рівномірність течії робочої рідини по довжині робочої траси для наведеної технологічної схеми може бути забезпечена за умов, якщо конструкція ЕІ відповідає вимогам: передній кут $\alpha \geq 0^\circ 30'$, задній кут $\beta = 3 \dots 5^\circ$, внутрішній кут $\gamma = 1^\circ$, радіус залуженої робочої кромки $r \geq 0,5$ мм. (рис. 2). За цих умов шорсткість обробленої поверхні складе $Ra \geq 6,3$ мкм, що відповідає четвертому класу шорсткості [10, 11].

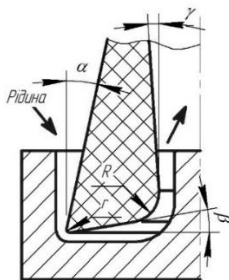


Рис. 2 – ЕІ для розмірної обробки електричною дугою отворів

Обмежену шорсткість $Ra 0,63$ мкм за цих умов можна пояснити тим, що динамічний тиск робочої рідини в зоні обробки по довжині траси течії робочої рідини все ще є недостатньо стабільним і керованим і визначається координатою заданої точки обробки. В цьому зв'язку запропоновано технологічний прийом, коли за умов чистової остаточної обробки трасу обробки скорочують за рахунок збільшення кількості переходів обробки, наприклад, якщо це стосується розрахункової схеми рис.1, за перший перехід здійснюють чорнову обробку і отримують отвір з припуском на подальшу обробку в межах 1...2 мм, за другий перехід здійснюють чистову обробку за рахунок видалення зазначеного припуску z (рис.3). Виконані експериментальні дослідження показали високу ефективність такої технології і покращення якості обробки, власне шорсткості обробленої поверхні до $Ra \leq 0,63$ мкм, тобто до восьмого класу і вище. За результатами таких досліджень отримано математичні моделі і відповідно графіки залежності шорсткості від сили електричного струму, статичного тиску робочої рідини і зазначеного припуску на чистову обробку.

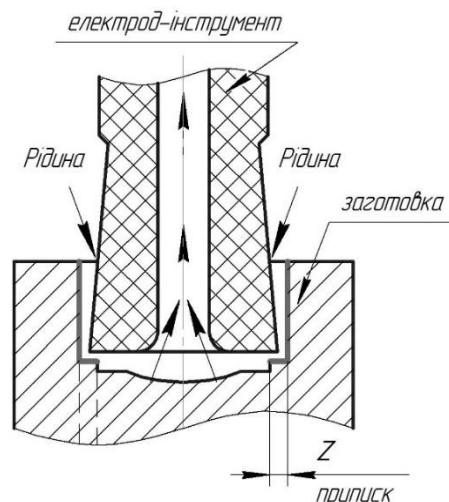


Рис. 3 – Чистова обробка з видаленням припуску на обробку z

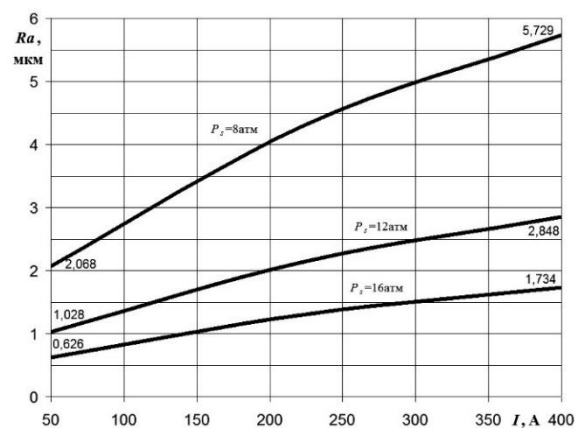


Рис. 4 – Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s (припуск на обробку $z = 1$ мм)

Математична модель шорсткості обробленої поверхні при реалізації зазначеної технологічної схеми формоутворення має вигляд, мкм:

$$Ra = 10,965 I^{0,49} P_s^{-1,724} \Delta^{0,438} \quad (10)$$

На рис. 4 показано залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s за умов припуску на обробку $z = 1$ мм. На рис. 5 показано залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s за умов припуску на обробку $z = 4$ мм.

На рис. 6 показано залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s за умов припуску на обробку $z = 7$ мм.

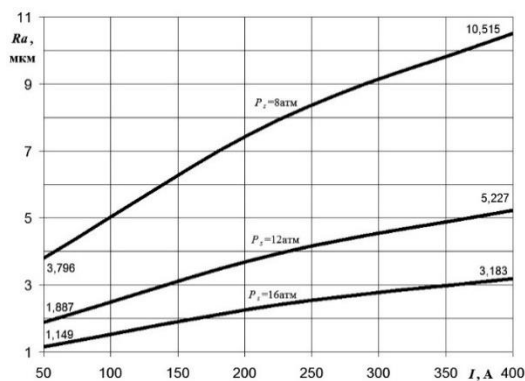


Рис. 5 – Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s (припуск на обробку $z = 4$ мм)

На рис. 6 показано залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s за умов припуску на обробку $z = 7$ мм.

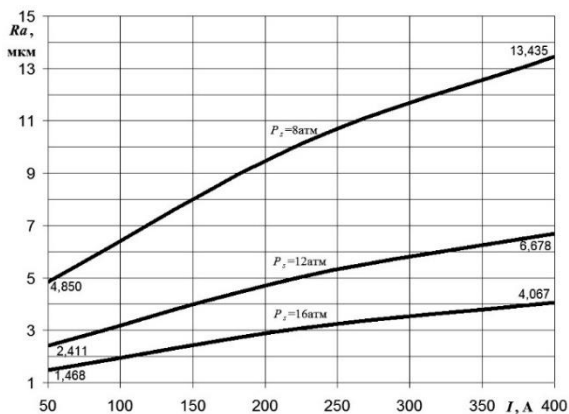


Рис. 6 – Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s (припуск на обробку $z = 7$ мм)

Таким чином, згідно викладеного, за зазначених умов, шорсткість обробленої поверхні зменшується при зменшенні сили технологічного струму I , зменшенні величини припуску на обробку z та збільшенні статичного тиску робочої рідини P_s і досягає значень 0,63 мкм і менше.

Високоєфективним є технічне рішення, коли описані технологічні переходи обробки здійснюються з використанням одного електрода-інструмента який відрізняється тим, що по довжині електрод-інструмента на відстані 5...10 мм від робочої кромки, назвемо її першою кромкою розташовують додатково ще одну, робочу кромку електрод-інструмента, елементи і геометрія якої повторюють елементи і геометрію першої робочої кромки, але усі поперечні розміри якої на 1...3 мм більше за умов обробки по внутрішньому контуру по відношенню до контуру першої кромки, утворюючи таким чином зовнішню еквідистанту, при отриманні отвору, і на 1...3 мм менше за умов обробки по зовнішньому контуру, по відношенню до контуру першої кромки, утворюючи таким чином внутрішню еквідистанту, при отриманні стержня та за умов спряження поверхонь зазначених робочих кромки радіусами 1...3 мм (рис. 7) [12].

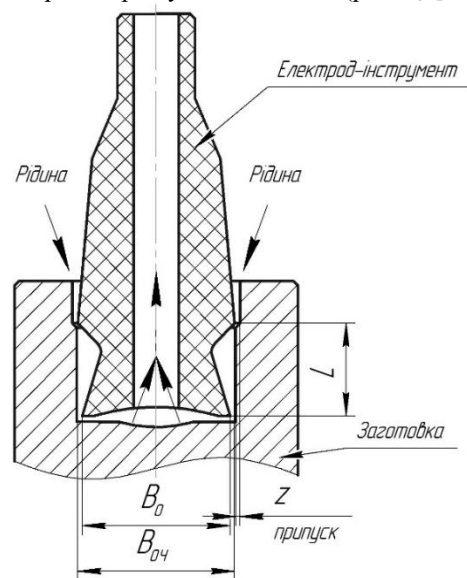


Рис. 7 – Конструкція ЕІ з двома робочими кромками

Висновки. Описано вплив фізико-технологічних характеристик процесу РОД на якість обробленої поверхні. Показано, що якість обробленої визначається, перш за все, динамічного тиску робочої рідини P_d та характером її течії (ламінальний або турбулентний) і, в меншій мірі, силою технологічного струму I , та не поступається порівняно з відомими процесами.

Описано технологічні прийоми та технічні рішення за умов реалізації процесу РОД, що забезпечують якість обробленої поверхні, власне шорсткості, до $Ra \leq 0,63$ мкм і менше.

Список літератури

1. Носуленко В.И. О физической природе, общем, отличиях и технических возможностях электрических разрядов и классификации электроразрядной обработки/ В.И. Носуленко // Электронная обработка металлов. Казань, 2006, №1. – С. 8-18.
2. Носуленко В.И. Размерная обработка металлов электрической дугой/ В.И. Носуленко // Электронная обработка металлов. Казань, 2005, №1. – С. 8-17.
3. Носуленко В. И. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07. / В.И. Носуленко. – Кировоградський держ. техн. ун-т. – К., 1999. – 32 с.
4. Носуленко В.И. О качестве источников тепла на электродах в условиях процесса размерной обработки электрической дугой / В.И. Носуленко, В.Н.Шмельев // Научно-теоретический и практический журнал "Оралдын ғылым жаршысы". Серия

- "Технические науки. Физика. Современные информационные технологии". – № 8 (87) – Казахстан – 2014. С. 61–68.
5. Шмельов В.М. Розмірна обробка електричною дугою спряжених робочих деталей розділових штампів: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07. /В.М. Шмельов. –К., 2013. – 20 с.
 6. Чумаченко О.С. Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07. /О.С. Чумаченко. –К., 2002. – 20 с.
 7. Шмельов В.М. Оптимізація якісних характеристик поверхонь робочих деталей розділових штампів в умовах розмірної обробки електричною дугою / В.М. Шмельов // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. "Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин". Випуск № 44. Кіровоград, КНТУ, 2014. – С.170–176.
 8. Шмельов В.М. Удосконалення технології виготовлення робочих деталей розділових штампів способом РОД /В.М. Шмельов // Збірник тез доповідей "Наука виробництву, 2016". XLVII наукова конференція викладачів, аспірантів та співробітників КНТУ. 2016. – С.20–22.
 9. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.; Машиностроение, 1992. – 672 с: ил.
 10. Патент на корисну модель № 110775 Україна, МПК (2016/01) B23K 9/00. Електрод-інструмент для розмірної обробки електричною дугою отворів / Носуленко В. І., Юр'єв В.В., Пархоменко А. С.; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – №201603083; Заявл. 25.03.2016; Опубл. 25.10.2016. бюл. №20.
 11. Носуленко В.І. Вплив геометрії та розмірів електрода-інструмента на технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою / В.І.Носуленко, В.М.Шмельов, В.В.Юр'єв // Вісник Херсонського національного технічного університету вип.61 (2). Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 89–97.
 12. Носуленко В.І. Електроди-інструменти для розмірної обробки металів електричною дугою / В.І.Носуленко, В.М. Шмельов, А.А. Пашченко // Матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018», випуск 4. – Херсон: ХНТУ, 2018. – С. 107–108
- References (transliterated)**
1. Nosulenko V. I. O fizicheskoy prirode, obshhem, otlichijah i tehnikeskikh vozmozhnostjakh jelektricheskikh rozrjadov i klassifikacii jelektrorozrjadnoj obrabotki [On the physical nature, general differences and technical capabilities of electrical discharges and the classification of electrical discharge processing]. *Jelektronnaja obrabotka metallov – Electronic metal processing*. Kishenev, 2006, vol. 1, pp. 8–18.
 2. Nosulenko V. I. Razmernaja obrabotka metallov jelektricheskoy dugoy [Size machining of metals by electric arc *Jelektronnaja obrabotka metallov – Electronic metal processing*. Kishenev, 2005, vol. 1, – pp. 8–17.
 3. Nosulenko, V. I. *Rozmerna obrobka metaliv elektrychnoyu dugoju: avtoref. dis. na zbuttya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk 05.03.07 "Protsezy fizyko-tekhnichnoi obrobky"* [Size machining of metals by electric arc. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.03.07 "The process of physical-technical processing"]. Kyiv, 1999. 32 p.
 4. Nosulenko, V. I. & Shmelev, V.N. O kachestve istochnikov tepla na elektrodakh v usloviyakh protsessu razmernoy obrabotki elektricheskoy dugoy [On the quality of heat sources at the electrodes under the conditions of dimensional processing the electric arc]. *Nauchno-teoreticheskij i prakticheskij zhurnal "Oraldyn gylm zharshysy". Seriya "Tekhnicheskie nauki. Fizika. Sovremennye informatsionnye tekhnologii"*. "Oral kalasi" – Scientific-theoretical and practical journal "Scientific-research organization". A series of "Technical Sciences. Physics and Modern Information Technologies". Kazakhstan, 2014, vol. 8 (87), pp. 61–68.
 5. Shmel'ov V. M. *Rozmerna obrobka elektrychnoyu dugoyu spryazheny'x robochy'x detalей rozdilovy'x shtampiv: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk 05.03.07 "Protsezy fizyko-tekhnichnoi obrobky"* [Dimensional processing by an electric arc of interfaced working details of dividing stamps. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.03.07 "The process of physical-technical processing"]. Kyiv, 2013, 21 p.
 6. Chumachenko O. S. *Rozmerna obrobka elektrychnoyu dugoyu ly'stovy'x detalей: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk 05.03.07 "Protsezy fizyko-tekhnichnoi obrobky"* [Dimensional machining of electric arc of sheet parts. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.03.07 "The process of physical-technical processing"]. Kyiv, 2002, 20 p.
 7. Shmel'ov V. M. () *Opty'mizaciya yakisny'x xaraktery'sty'k poverxon' robochy'x detalей rozdilovy'x shtampiv v umovax rozmirnoy obrobky' elektrychnoyu dugoyu* [Optimizing the quality characteristics of the surfaces working details dividing of stamps in the conditions dimensional processing by electric arc]. *Zagal'nodержavny'j mizhvidomchy'j nauko-tekhnichny'j zbirny'k. – National interdepartmental scientific and technical collection. "Design, manufacture and operation of agricultural machines"* "Konstruyuvannya, vy'robny'ctvo ta ekspluatatsiya s/g mashyn". Kirovohrad, 2014, vol. 4, pp.170–176.
 8. Shmel'ov V. M. *Udoskonalennya tekhnologiyi vy'gotovlennya robochy'x detalей rozdilovy'x shtampiv sposobom ROD* [Improving the technology of manufacturing the working parts of puncturing stamps by the method of dimensional machining by an electric arc]. *Zbirny'k tez dopovidej "Nauka vy'robny'ctva, 2016". XLVII naukova konferenciya vy'kladachiv, aspirantiv ta spivrobitny'kiv KNTU – Collection of abstracts "Science for Production, 2016". XLVII scientific conference of lecturers, postgraduates and staff of KNTU*. Kirovohrad, KNTU, 2016, pp. 20–22.
 9. Idelchik, I. Ye. *Reference book on hydraulic resistance*. (M. O. Shteynberga Ed.). (3d ed.). Moscow, Mashinostroenie 1992. 672p.
 10. Nosulenko V. I., Yur'yev V.V., Parxomenko A. S. *Elektrod-instrument dlya rozmirnoy obrobky' elektrychnoyu dugoyu otvoriv* [Electrod-tool for dimensional machining by an electric arc of holes]. Patent na kory'snu model' Ukrainy, no. 110775 MPK (2016/01) V23K 9/00, 2016.
 11. Nosulenko V. I. Shmel'ov V. M. Yur'yev V. V. (2017) *Vplyv geometriyi ta rozmiriv elektroda-instrumenta na tekhnologichni xaraktery'sty'ky' procesu rozmirnoy obrobky' elektrychnoyu dugoyu* [Influence of the geometry and dimensions of the electrode-tool on the technological characteristics of the process of dimensional machining by an electric arc] *Visny'k Xerson's'kogo nacional'noho tekhnichnogo universy'tetu – Bulletin of Kherson National Technical University №61(2)*, 89-97[in Ukrainian].
 12. Nosulenko V.I. Shmel'ov V.M., A.A. Pashchenko *Elektrody'-instrumenty' dlya rozmirnoy obrobky' metaliv elektrychnoyu dugoyu* [Electrodes-tools for dimensional machining of metals by an electric arc]. *Materialy' IV-oyi Mizhnarodnoyi nauko-tekhnichnoyi konferenciyi «Suchasni tekhnologiyi promy'slovogo kompleksu: bazovi procesni innovaciyi – 2018» – Materials of the IV International Scientific and Practical Conference "Modern Technologies of the Industrial Complex: Basic Process Innovations – 2018"*, Xerson: XNTU, 2018, pp. 107–108.

Надійшло (received) 09.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Носуленко Віктор Іванович (Носуленко Виктор Иванович, Nosulenko Viktor Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-6171>; e-mail: nosulenko.wi@gmail.com

Шмельов Віталій Миколайович (Шмелев Виталий Николаевич, Shmelyov Vitaliy Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2567-9980>; e-mail: ShmelyovVM@gmail.com

Пашченко Андрій Араратович (Пашченко Андрей Араратович, Paschenko Andrey Araratovich) – Центральноукраїнський національний технічний університет, аспірант кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій, м. Кропивницький, Україна; e-mail: pashchenko_andryushka@mail.ru